Привет, коллеги. Сегодня я буду выступать с докладом «Космические вычисления. Защищаем бортовой компьютер вашего спутника», посвященным аппаратной части космических интегральных схем.

Сначала мы рассмотрим эту тему с точки зрения обывателя и постепенно будем наращивать технические подробности.

Так как тема обширная, а время на доклад ограничено, глубоко рассмотрим только аппаратную часть, и основное внимание уделим радиационной устойчивости интегральных схем, лишь одно требование из длинного ряда, которое, тем не менее, лучше других подходит для предмета «Архитектура компьютера».

Рассмотрим воздействие потоков заряженных частиц на элементы интегральных схем и другие причин, мешающих использованию стандартных коммерческих ИС.

Исследуем архитектурные и конструктивные особенностей интегральных схем для космических аппаратов и особых схемотехнических и технологических решений, направленных на повышение надежности и долговечности электронных компонентов, включая использование материалов, устойчивых к радиации.

После этого мы разоблачим некоторые мифы о радиационной устойчивости и подведем итоги.

Итак, поехали.

1. Представьте себя астронавтом Вы покидаете плотные слои атмосферы и устремляетесь к неизведанным мирам в космическое путешествие.
2. Перед вами бесконечная пустота и необъятный космос. **Но так ли тут пусто?**
3. Вы на миг закрываете глаза и **вдруг видите вспышку**. Может это мигнула аварийная лампочка прибора?
4. Нет, все идет в штатном режиме.
5. Закрываете снова – **опять вспышка**. Раз в пару минут яркое световое пятнышко сквозь закрытые веки. Но вскоре выясняется, что это видите не только вы, но и все члены экипажа.
6. Звучит как трейлер фантастического фильма, но на самом деле с такой ситуацией столкнулись участники легендарной миссии «Аполлон-11», впервые побывавшие на луне. После этого почти все члены экипажей космических кораблей «Аполлон» рассказывали про такие световые пятна.
7. Разгадка оказалась проста. Космос оказался не таким пустым как многие считают.
8. На самом деле он наводнен
9. маленькими заряженными частицами – в основном протонами.
10. Но встречаются и электроны, и ядра гелия, и другие более тяжелые частицы.
11. Частицы очень разных энергий летят от нашего Солнца. Какие-то летят от звезд нашей галактики Млечный Путь. Есть частицы из глубин межзвездного пространства и даже из других галактик.
12. Именно заряженные частицы, попадая на сетчатку глаза, оставляют яркие вспышки, которые и наблюдали астронавты из миссий «Аполлон».
13. Космические лучи довольно опасны, и дальше мы в этом убедимся. И они могут влиять не только на людей, но и на электронные приборы. Угроза настолько серьезная, что в микроэлектронике есть отдельное направление – радиационно-стойкое проектирование. Целое научное направление изучает, как заряженные частицы влияют на интегральные схемы, какие лучше использовать материалы, как нужно экранировать и проектировать чипы, чтобы частица не приводила к нарушению работы.
14. А что на Земле?
15. А что же защищает нас от этой беспощадной угрозы на Земле? Многие думают, что это наша атмосфера. Однако не все так просто. Главный наш защитник – это магнитосфера. Магнитное поле, как защитная оболочка вокруг Земли, экранирует большую часть заряженных частиц. *Без этого поля не было бы ни атмосферы, ни океанов, ни жизни на Земле. Если хотите представить себе, что было бы с землей без магнитосферы – посмотрите на Марс. Считается что его атмосферу и океаны просто «сдуло» солнечным ветром.*
16. Магнитное поле почти не пропускает заряженные частицы к поверхности, но и не может отразить их все обратно в космос. Значительная часть застревает посередине – в радиационных поясах Ван Аллена. Всего таких пояса два – внутренний (на расстоянии 4000 км из протонов) и внешний (на расстоянии 17 000 км из электронов)
17. А над Бразилией есть аномалия – она так и называется Бразильская Магнитная Аномалия (БМА). Там «защитный слой» магнитосферы истончается и космические аппараты, пролетающие на низких орбитах, оказываются беззащитными перед потоками космической радиации. Из всех магнитных аномалий Земли наиболее значительное влияние на потоки частиц (космических лучей) оказывает БМА. В этой области величина магнитного поля на уровне моря такая, как на высоте порядка 1000 км вне аномалий. Так, наблюдения орбитальным телескопом «Хаббл» из-за повышенного уровня радиации невозможны тогда, когда телескоп пролетает над этой аномалией.
18. Конечно, на поверхности Земли проблема космического излучения стоит не так остро. Но значит ли это, что радиационной стойкостью для микроэлектроники можно пренебречь?
19. Конечно нет
20. Существуют такие области, в которых всего одна ошибка может стоить очень дорого. Медицина, транспорт, энергетика – даже небольшой сбой контролирующего оборудования может привести к катастрофическим последствиям. Даже крохотный шанс такой ошибки недопустим. **А такой шанс есть.**
21. Хотя на Земле вероятность единичного сбоя из-за космического излучения в 300 раз ниже, чем на высоте 9000 метров, но иногда этому явлению приписывают самые необъяснимые события, которые происходят с компьютерной техникой.
22. Вы можете просмотреть отчет по одиночным сбоям за 2016 год
23. и примерный уровень ошибок из-за космического излучения в некоторых кремниевых микросхемах из исследования IBM за 1979 год.
24. В 2003 году в Бельгии проходили выборы.
25. В ходе компьютерного голосования, малоизвестная кандидатка случайно получила в одном из округов (городок Схарбек) на 4096 голосов больше, чем за неё в действительности проголосовали. После ручного пересчета голосов оказалось, что в реальности ее результат был меньше на 4096 голосов! Более того, количество голосов других кандидатов никак не изменилось! Такая разница могла получиться из-за изменения всего одного бита в регистре, который хранил результат Марии. После долгих разбирательств был сделан вывод, что самая вероятная причина ошибки – это попадание одиночной заряженной частицы в незащищенный триггер. Всего одна частица могла перевернуть исход выборов!
26. В 2013-м игрок на скорость в Super Mario 64 неведомым образом попал на недоступную обычным образом в игре платформу, которая улучшила его время в игре на несколько секунд. И до сих пор никто не смог это воспроизвести после него, включая его самого.
27. Это может указывать на то, что это могло произойти из-за одноразрядного изменения значения высоты Марио. Основная теория состоит в том, что этот переворот битов был вызван событием космических лучей, хотя вероятность такого события чрезвычайно редка.
28. Намного более опасный и страшный инцидент произошел на борту Airbus A330 направлявшемся из Сингапура в Перт в 2008 году.
29. Самолет внезапно изменил угол атаки, «упав» на 200 метров за 20 секунд, а потом сделал это ещё раз, травмировав в сумме более 100 человек на борту. Подобной ошибки ранее не встречались и не были выявлены производителем в ходе анализа безопасности. Компания «Airbus» заявила, что им не было известно о подобных инцидентах на других самолётах компании. И всё это, вероятнее всего, — из-за космических лучей, элементарных частиц с высокой энергией.
30. Самый громкий случай, связанный с космическим излучением и микросхемами произошел в 2012 году с Фобосом-Грунт, одним из наиболее амбициозных космических проектов современной России. Этот космический корабль должен был сесть на поверхность марсианской луны Фобос, собрать образцы почвы, и привезти их обратно на Землю. Но вместо этого он несколько недель беспомощно дрейфовал на низкой околоземной орбите (НОО) из-за отказа бортового компьютера перед запуском двигателей, которые должны были отправить корабль в сторону Марса.
31. В последовавшем отчёте возложили вину на тяжёлые заряженные частицы в составе галактических космических лучей, столкнувшиеся с чипами SRAM и вызвавшие отказ чипа из-за чрезмерной силы проходящего через него тока. Чтобы справиться с этой проблемой, два процессора, работавшие в компьютере ЦВМ22, запустили перезагрузку. После этого зонд перешёл в безопасный режим ожидания команд с Земли. К сожалению, инструкции так и не поступили. Если коротко, то в конкретной микросхеме произошел эффект ТЗЧ — тяжелой заряженной частицы.
32. Участники разработки, возможно, недооценили трудности работы компьютеров в космосе.
33. Как космос
34. мешает компьютерам жить.
35. Начать разговор нужно с важного дисклеймера: радиационная стойкость не является центром мира и единственным качеством, которым должна обладать подходящая для использования в космосе или другой агрессивной среде микросхема.

Радиационная стойкость — это лишь одно требование из длинного ряда, включающего в себя надежность, расширенный температурный диапазон, устойчивость к электростатическому разряду, вибростойкость — и достоверное подтверждение всех вышеперечисленных параметров, то есть длительную и дорогую сертификацию.

1. Понятия «радиационная стойкость» и «радиационностойкая микросхема» — это грандиозные упрощения. На самом деле существует много разных источников ионизирующего излучения, и они могут влиять на функционирование электронных приборов по-разному. Соответственно, для разных применений необходима стойкость к разным наборам воздействующих факторов и разным уровням воздействия, так что «стойкая» микросхема, предназначенная для работы на низкой околоземной орбите совершенно не обязана нормально работать при разборе завалов в Чернобыле.
2. В «штуках частиц» космическое излучение состоит на 90% из протонов (т.е. ионов Водорода), на 7% из ядер гелия (альфа-частиц), ~1% более тяжелые атомы и ~1% электроны. Ну и звезды (включая солнце), ядра галактик, млечный путь — обильно освещают все не только видимым светом, но и рентгеновским и гамма излучением. Во время вспышек на солнце — радиация от солнца увеличивается в 1000-1'000'000 раз, что может быть серьёзной проблемой (как для людей будущего, так и нынешних космических аппаратов за пределами магнитосферы земли).
3. Нейтронов в космическом излучении нет по очевидной причине — свободные нейтроны имеют период полураспада 611 секунд, и превращаются в протоны. Даже от солнца нейтрону не долететь, разве что с совсем уж релятивистской скоростью. Небольшое количество нейтронов прилетает с земли, но это мелочи.
4. Ионизирующее излучение называется ионизирующим, потому что выделение в объеме вещества энергии при торможении прилетающих частиц ионизирует вещество. У каждого материала своя энергия, необходимая для ионизации и создания электронно-дырочной пары. Для кремния это 3.6 электрон-вольт, для его оксида — 17 эВ, для арсенида галлия — 4.8 эВ. Также прилетевшая частица может не ионизировать атом, а “сдвинуть” его с правильного места в кристаллической решетке (в кремнии для этого нужно передать атому 21 эВ). Созданные в веществе электронно-дырочные пары могут по-разному влиять на электрические и физические свойства и на поведение электрической схемы. Электроны, гамма и рентгеновское излучение
5. Когда гамма и рентгеновское излучение (в том числе вторичное, полученное из-за столкновения электронов с корпусом аппарата) проходит через микросхему — в подзатворном диэлектрике транзисторов начинает постепенно накапливаться заряд, и соответственно начинают медленно изменятся параметры транзисторов — пороговое напряжение транзисторов и ток утечки.
6. Другой специфический для транзисторов дозовый эффект состоит в том, что они могут (не обязательно) реагировать не только на уровень набранной дозы, но и на скорость ее набора — чем медленнее набирается доза, тем хуже стойкость. Этот эффект называется ELDRS (Enhanced Low Dose Rate Sensitivity) и он сильно усложняет и удорожает тестирование КМОП-схем.
7. На разных орбитах полгощенная доза радиации разная.
8. На низкой орбите 300-500км (там где и люди летают на МКС) годовая доза может быть 100 рад и менее, соответственно даже за 10 лет набранная доза будет переносима гражданскими микросхемами. А вот на высоких орбитах >1000km годовая доза может быть 10'000-20'000 рад, и обычные микросхемы наберут смертельную дозу за считанные месяцы.
9. Обычная гражданская цифровая микросхема уже после 5000 рад может перестать нормально работать (впрочем, человек может перестать работать уже после 500-1000 рад).
10. При торможении на корпусе электронного устройства электронов, протонов, космических частиц возникают рентгеновское и гамма-излучение, тяжелые ионы. Попадая в КМОП-структуры эти частицы ионизируют затвор и подзатворный оксид (SiO2). В подзатворном окисле накапливается индуцированный излучением положительный заряд (рис.), а на границе раздела окисла с подложкой возникает паразитный проводящий слой. То есть изменяются рабочие характеристики транзисторов. Происходит смещение пороговых напряжений и увеличение токов утечки, изменяется время нарастания и спада фронтов и т.д. При этом старение интегральной схемы и степень разрушения зависят от суммарной дозы полученной радиации (Total Dose) и интенсивности облучения.
11. Помимо этого, гамма и рентгеновское излучение заставляет все pn переходы внутри микросхемы работать как маленькие «солнечные батареи» — и если в космосе обычно радиация недостаточна, чтобы это сильно повлияло на работу микросхемы, во время ядерного взрыва потока гамма и рентгеновского излучения уже может быть достаточно, чтобы нарушить работу микросхемы за счет фотоэффекта.
12. Затем — флеш/EEPROM память. Кто-то может еще помнить старые микросхемы памяти с ультрафиолетовым стиранием: Чтобы снизить стоимость, выпускалась и версия без кварцевого окна, считавшаяся однократно-программируемой. Но народные умельцы все равно умудрялись её стирать — рентгеновским излучением. Точно такой же эффект есть и в космосе — радиация мееедленно стирает данные в eeprom/flash памяти, поэтому все активно исследуют FRAM/MRAM память для космических применений (у нас этим занимается Интеграл и Ангстрем). Не стирается от радиации также память на пережигаемых и закорачиваемых перемычках — fuse и antifuse, с этим разбирается Микрон.
13. Но самая большая проблема космической электроники еще впереди.
14. Это – Тяжелые заряженные частицы (ТЗЧ) — протоны, альфа-частицы и ионы больших энергий
15. Эти частицы имеют такую высокую энергию, что «пробивают» микросхему насквозь (вместе с корпусом спутника), и оставляют за собой «шлейф» заряда. Возможно именно это было с Фобос-Грунтом — по официальной версии не-радиационно-стойкие импортные микросхемы памяти дали сбой уже на втором витке, а это возможно только из-за ТЗЧ (по суммарной набранной дозе излучения на низкой орбите гражданский чип мог бы еще долго работать).
16. У субатомных частиц космического излучения гигантская энергия, и в результате столкновения с материальными ядрами создаётся каскад новых частиц, которые порождают новые столкновения: пионы, нейтроны, протоны, мюоны, электроны, позитроны, фотоны.
17. Возрастает потребление питания, рассеивание тепла и может произойти термическое разрушение транзистора. Чаще всего неполадки происходят по причине случайных воздействий (Single Event Effects, SEE), когда тяжелые частицы (космические лучи, протоны, электроны, альфа-частицы, термические нейтроны и т.д.) попадают в ИС
18. В лучшем случае это может привести к программной ошибке (0 стать 1 или наоборот — single-event upset, SEU)
19. Вот как-то так
20. А это детектор космических лучей. Но мы с вами знаем, что он не будет работать, если SEU изменит while(true) на while(false)
21. Случайный сбой переключения свойственен как элементам памяти, так и стандартным схемотехническим элементам. Логический элемент может воспринимать импульс тока, вызванный излучением, как сигнал данных. Если это происходит одновременно с фронтом синхроимпульса, ложный сигнал сохраняется и может быть использован другими устройствами. Несмотря на то, что пострадавший логический элемент вернется к правильному состоянию, ложный сигнал может достигнуть памяти и изменить хранящиеся в ней данные. Чем выше частота тактовой синхронизации, тем больше вероятность SET (рис). Благодаря своему быстродействию современные приборы отреагируют на радиационный импульс, слишком короткий для предыдущих поколений ИС.
22. …в худшем — привести к тиристорному защелкиванию (single-event latchup, SEL). У защелкнутого чипа питание закорачивается с землей, ток может идти очень большой, и привести к сгоранию микросхемы. Если питание успеть отключить и подключить до сгорания — то все будет работать как обычно. Именно защелкивание ограничивает использование обычных наземных микросхем в космосе со всякими программными хитростями для увеличения надежности. Как с этим бороться мы рассмотрим в следующей части доклада.
23. Причины возникновения защелкивания – большая разность потенциалов на входе транзистора, вызванная излучением, и паразитные структуры, свойственные КМОП-технологии (пара p-n-p- и n-p-n-транзисторов образует структуру, подобную тиристору)
24. Бор используется для легирования кремния и в виде боросиликатного стекла для изоляции слоев металла. Проблема в том, что природный бор на 20% состоит из Бора-10, который очень хорошо реагирует с нейтронами с выделением альфа-частицы прямо в сердце микросхемы. Это приводило к ошибкам работы микросхем, особенно памяти.
25. Нейтроны получаются как вторичная радиация, или прилетают от земли, как мы помним в космической радиации их нет. 10B + n → [11B] → α + 7Li + 2.31 MeV. Эта одна из проблем которую удалось решить — используя для производства микросхем только изотоп 11B. Теперь нейтроны практически беспрепятственно проходят через микросхему, не вызывая ошибок.

Это свойство бора кстати используется для экстренной остановки атомных реакторов — в него заливают борную кислоту, обогащенную изотопом бор-10 — альфа частицы там не проблема.

1. **А вот теперь рассмотрим, как защитить наши интегральные схемы от частиц, излучений и всего такого.**
2. Радиационно стойкие ИС применяются в оборонной и космической промышленности, медицинской электронике. Они гарантируют надежную работу и неизменность параметров устройств в условиях различных воздействий радиации.

Производители таких микросхем вынуждены бороться с проявлениями как одиночных сбоев, так и общей дозы радиации. При этом общая тенденция – повышение радиационной стойкости ИС на всех этапах конструирования (выбор схемотехнических элементов, моделирование в САПР, процесс изготовления, корпусирование).

1. Рассмотрим основные методы повышения радиационной стойкости ИС.
2. Наиболее распространен метод тройного резервирования (Triple Modular Redundancy, TMR), основанный на создании дубликатов критических узлов схемы
3. Общее значение выбирается схемой голосования на основании выходов этих элементов. Таким образом, воздействие излучения изменит состояние логического элемента, только если пострадает сразу несколько узлов.
4. Чем больше избыточность, тем больше задействуется полезной площади кристалла и тем меньше вероятность возникновения SEU. Недостаток этого подхода – увеличение числа транзисторов для выполнения одной и той же функции. Так, ячейка SRAM из шести транзисторов превращается в 10- или 12-транзисторную ячейку, что увеличивает не только задержку, но и стоимость. Задействуется большая площадь, что ведет к дополнительному рассеиванию энергии.
5. TMR не исправляет ошибки, а только предоставляет правильное значение. Более изощренные методы используют дополнительно к дублированию критических элементов обратные связи для восстановления правильных значений на пострадавших узлах.

Избыточная логика может занимать в три или четыре раза больше площади обычного элемента. В ячейках памяти часто применяют двойные DICE-защелки (Dual Inter-locked Storage Cell) (рис.6). В них использована четырехузловая структура избыточности. Состояния сохраняются как 1010 или 0101. Два контура обратной связи гарантируют защиту от SEU при воздействии только на один узел системы.

1. Проиллюстрирую масштаб задач, стоящих перед разработчиками чипов любопытным примером. Источник опорного напряжения (ИОН), равного ширине запрещенной зоны кремния (bandgap voltage reference) — относительно простая и хорошо известная схема. При воздействии радиации меняются параметры биполярных транзисторов, используемых в качестве диодов (падает коэффициент усиления из-за появления утечки эмиттер-база).

В результате опорное напряжение обычной схемы ИОН, определяющее точность всех измерений, может сместиться, скажем, на 15-20%, что соответствует эффективной разрядности АЦП в два-три бита. У схемы справа опорное напряжение изменяется в пределах 1% (что больше 7 бит) при дозе ионизирующего излучения в 4.5 МГр.

Для того, чтобы добиться этого впечатляющего результата, схему потребовалось серьезно переработать, добавив целую россыпь обратных связей, компенсирующих дозовую утечку. В радстойком варианте примерно в четыре раза больше элементов, чем в обычном, и его энергопотребление в два раза больше.

1. Для улучшения противодействия одиночным сбоям и сбоям переключения некоторые элементы (триггеры) оснащают структурами задержки, которые удерживают от переключения логику в течение времени, достаточного для рекомбинации генерированных ионом зарядов.
2. Триггеры иногда оснащают подсистемами, удерживающими его от переключения в течение времени рекомбинации сгенерированных вторгшимся ионом зарядов. Недостаток этого метода — сниженное быстродействие системы в целом.
3. Другой подход состоит в сохранении (**Temporal Sampling**) состояний узлов схемы с периодом, большим, чем длительность импульса тока, вызванного излучением.

Обычно его применяют в дополнение к TMR.

Такая временная фильтрация защищает и от SET: значения сигнала данных запоминаются с некоторой временной задержкой, после чего производится голосование на основе сохраненных состояний.

Данный метод чувствителен к сбоям переключения на линии синхронизации и связан с увеличением площади схемы примерно в три раза.

1. Помехозащищенное кодирование: биты чётности или корректирующие коды (англ. ECC) используются многими производителями для защиты больших объёмов памяти.
2. Однако при воздействии на память относительно высокоэнергетических нейтронов возникают вторичные заряженные частицы, которые способны инициировать переключение сразу нескольких ячеек, в таких случаях контроль чётности уже не способен выявить ошибку.
3. Такие методы как TMR и ЕСС повышают надежность микросхем на уровне синтеза и библиотек элементов. Это, в сочетании с SOI-процессом изготовления и соответствующими средствами САПР, позволяет разрабатывать радиационно стойкие ASIC, сравнимые по характеристикам с коммерческими аналогами.
4. Мы помним про грозного врага космической интегральной схемы – Single-Event Latchup, тиристорное защелкивание. Существует много способов борьбы с ним: Контроль тока потребления узлов, Silicon-on-insulator (кремний на диэлектрике) и Triple-well процесс. Исторически, в СССР и России больше работали с кремнием на сапфире, в США — как можно больше использовать обычный кремний с triple-well.
5. Использование микросхем на сапфировой подложке (Silicon-on-sapphire, SOS, в более общем виде Silicon-on-insulator, SOI) **исключает формирование биполярных паразитных транзисторов и соответственно защелкивание**. Программные ошибки тем не менее все равно могут быть. Пластины кремний-на-сапфире стоят дорого, обрабатывать их сложно, и они имеют ограниченное применение в гражданском секторе — соответственно производство получается дорогим.
6. Вблизи поверхности подложки имплантируется слой молекул кислорода, из которого нагреванием формируют непрерывный слой оксида толщиной порядка 0,2 мкм. Полученный диэлектрик изолирует канал КМОП от кремниевой подложки, при этом сток-истоковые области достигают углубленного окисла.

Тем самым снижаются токи утечки и паразитные емкости, исключается возможность образования паразитных структур типа тиристора.

Из-за меньшего слоя подзатворного кремния в SOI-транзисторах величина накапливаемого заряда, вызванного длительным воздействием радиации, снижается в десять раз.

Себестоимость SOI-процесса в 5–10 раз выше, чем при традиционной КМОП-технологии.

1. Triple-well процесс — он также очень сильно снижает возможность защелкивания микросхемы за счет дополнительной изоляции транзисторов pn-переходом, но не требует каких-то особенных пластин или оборудования и соответственно само производство намного дешевле, например, кремния на сапфире.
2. Еще чтобы повысить надежность КМОП-устройств на уровне схемотехнических элементов библиотек и проектирования устройства, применяют различные подходы.

Например, увеличивают длину затвора критически важных транзисторов. Для предотвращения одиночных сбоев повышают уровень сигнала, необходимый для переключения триггера.

1. **Наконец, рассмотрим некоторые мифы вокруг радиационно-стойких интегральных схем.**
2. Первый Миф. А давайте спутник в радиационную защиту завернем, и гражданские микросхемы поставим.

Природа с усмешкой смотрит на игрушечные ускорители элементарных частиц— на большом адронном коллайдере ими были (вернее будут) достигнуты жалкие энергии в 7 TeV для протонов, и 574 TeV для ионов свинца. А с галактическими космическими лучами к нам иногда прилетают частицы с энергией 3\*1020 eV, т.е. 300 миллионов тераэлектронвольт.

Откуда берутся такие частицы еще вопрос, т.к. это выше теоретического предела энергии космических частиц Грайзена — Зацепина — Кузьмина. В человеко-понятных единицах, это около 50Дж, т.е. в одной элементарной частице энергия как у пули мелкокалиберного спортивного пистолета.

1. Когда такая частица сталкивается например с атомом свинца радиационной защиты — она просто разрывает его в клочья. Осколки также будут иметь гигантскую энергию, и также будут разрывать в клочья все на своём пути.

В конечном итоге — чем толще защита из тяжелых элементов — тем больше осколков и вторичной радиации мы получим. Свинцом можно сильно ослабить только относительно мягкую радиацию земных ядерных реакторов.

Аналогичным эффектом обладает и гамма-излучение высоких энергий — оно также способно разрывать тяжелые атомы в клочья за счет фотоядерной реакции.

1. И наконец, давайте взглянем на конструкцию рентгеновской трубки: Электроны от катода летят в сторону анода из тяжелого металла, и при столкновении с ним — генерируется рентгеновское излучение за счет тормозного излучения.

Когда электрон космического излучения прилетит к нашему кораблю — то наша радиационная защита и превратится в такую-вот естественную рентгеновскую трубку, рядом с нашими нежными микросхемами.

1. Из-за всех этих проблем радиационную защиту из тяжелых элементов, как на земле — в космосе не используют.

Используют защиту большей частью состоящую из алюминия, водорода (из различных полиэтиленов и проч), т.к. его разбить можно только на субатомные частицы — а это намного сложнее, и такая защита генерирует меньше вторичной радиации.

1. Но в любом случае, от ТЗЧ защиты нет, более того — чем больше защиты — тем больше вторичной радиации от высокоэнергетических частиц, оптимальная толщина получается порядка 2-3мм Алюминия.

Самое сложное что есть — это комбинация защиты из водорода, и чуть более тяжелых элементов (т.н. Graded-Z) — но это не сильно лучше чисто «водородной» защиты. В целом, космическую радиацию можно ослабить примерно в 10 раз, и на этом все.

1. Миф Два. Современные тех.процессы менее радиационно-стойкие. Шанс получить ошибку в конкретном транзисторе пропорционален его объему, а он быстро уменьшается с уменьшением технологии (т.к. транзисторы становятся не только меньше по площади, но и тоньше). Помимо этого, отмечено аномальное увеличение радиационной стойкости с современными толщинами подзатворных диэлектриков (3нм и менее).
2. В целом, на современных стойких тех.процессах (65нм и менее) рутинно получаются микросхемы выдерживающие дозу облучения в 1млн рад, что превышает все разумные требования по стойкости. Стойкость к защелкиванию и программным ошибкам — достигается за счет triple-well и специальных архитектурных решений.
3. Подведем итог.
4. Обычным компьютера тяжело работать в космосе.
5. Людям постоянно приходится решать нетривиальные технические задачи для использования интегральных схем в космосе.
6. Микроэлектроника вообще и космическая микроэлектроника в частности — одна из самых быстро прогрессирующих областей науки и техники.
7. Радиационно-устойчивые интегральные схемы представляют собой важную технологию для обеспечения надежной работы электронных устройств в условиях высокой радиации.
8. Использование специальных материалов и конструктивных решений позволяет увеличить радиационную стойкость интегральных схем и снизить вероятность возникновения ошибок в их работе.
9. Наконец, небольшая схема по пройденному материалу доклада.
10. И вопрос для экзамена. Не тот вопрос Ж)
11. Почему в интегральных схемах, построенных по обычной КМОП-технологии, в отличии от схем с техпроцессом «кремний на диэлектрике», может возникнуть защелкивание?

Опишите механизм возникновения тиристорного защелкивания под воздействием тяжелых заряженных частиц и способы борьбы с ним.

1. Здесь вы сможете найти эти слайды и некоторые другие материалы по докладу.
2. И прочитать остальные ссылки…
3. …
4. …
5. …
6. …
7. Хотел бы я еще рассказать про категории микросхем, чем отличается приемка 1, 5 и 9 у российских производителей, сравнить современных лидеров по разработке радиационно-стойких интегральных схем, рассмотреть текущие разработки разных стран. Но настало время прощаться…

Спасибо за внимание! Если у вас после этой пары останутся вопросы, не стесняйтесь задавать их мне в телеграмме или на почте. Жду… ваших… вопросов.